



Hoja de Datos - Tecnología de Control de Contaminantes del Aire



- Nombre de la Tecnología:** Precipitador Electrostático Seco (PES) - Tipo Tubo-Alambre (también llamado PES tubular)
- Tipo de Tecnología:** Dispositivo de Control - Captura/Disposición
- Contaminantes Aplicables:**

Materia Particulada (PM), que incluye materia particulada menor o igual a 10 micras (μm) de diámetro aerodinámico (PM_{10}), materia particulada menor o igual a 2,5 micras de diámetro aerodinámico ($\text{PM}_{2,5}$), y contaminantes peligrosos del aire (CPA) que existen en forma particulada, tales como la mayoría de los metales (el mercurio es la excepción notable, ya que una porción importante de las emisiones se encuentran en forma de vapor elemental).

- Límites de Emisiones Alcanzables/Reducciones:**

Las eficiencias típicas de equipos nuevos varían entre 99 y 99,9%. Los equipos existentes más antiguos tienen un rango de eficiencia de operación de 90 a 99,9%. Aunque son varios los factores que determinan la eficiencia de recolección de los PES, el más importante es el tamaño del PES. El tamaño determina el tiempo de tratamiento; entre más tiempo permanezca una partícula en el PES, es más probable que ésta sea atrapada. Al maximizar la fuerza del campo eléctrico, se maximiza la eficiencia de recolección del PES (*STAPPA/ALAPCO*, 1996). La eficiencia de recolección también se ve afectada en cierto grado por la resistividad del polvo, la temperatura del gas, la composición química (del polvo y del gas) y por la distribución del tamaño de las partículas.

- Tipo de Fuente Aplicable:** Puntual

- Aplicaciones Industriales Típicas:**

Muchos de los precipitadores electrostáticos (PE) antiguos son de diseño tubo-alambre, que consiste en un solo tubo colocado encima de una chimenea (*EPA*, 1998). Los PES del tipo con tubería se utilizan en ocasiones en la industria textil, papelera y procesadora de pulpa de madera, metalúrgica (incluyendo los hornos de coque), en los incineradores de residuos peligrosos, y en la producción de ácido sulfúrico, entre otros, aunque también son empleados otros tipos de PE. Los precipitadores electrostáticos húmedos del tipo tubo-alambre se utilizan mucho más frecuentemente que los PES tipo tubo-alambre, los cuales son usados sólo en casos en donde la limpieza en húmedo no es recomendable, tales como en corrientes a temperaturas altas o cuando existen restricciones sobre las aguas residuales (*EPA*, 1998; *Flynn*, 1999).

- Características de la Emisión:**

- Flujo de Aire:** Los flujos de aire típicos para los PES tipo tubo-alambre varían de 0,5 a 50 metros cúbicos estándares por segundo (sm^3/s) (1.000 a 100.000 pies cúbicos estándares por minuto (scfm)) (*Flynn*, 1999).

- b. **Temperatura:** Los PES tipo tubo-alambre pueden operar a temperaturas muy altas, hasta los 700°C (1300°F) (AWMA, 1992). La temperatura de operación del gas y la composición química del polvo son los factores clave que influyen en la resistividad del polvo y deben ser cuidadosamente considerados en el diseño del PE.
- c. **Cargamento de Contaminante:** Las concentraciones típicas a la entrada de un PE tipo tubo-alambre son de 1 a 10 grams (g)/sm³ (0,5 a 5 granos (gr)/scf). Es común darle un pretratamiento a la corriente residual, normalmente con rocío de agua o torre lavadora, para bajar la temperatura y la concentración de la corriente contaminada a un rango más manejable. Los flujos altamente tóxicos con concentraciones mucho menores de 1 g/m³ (0,5 gr/scf), también son controlados en ocasiones por PE (Flynn, 1999).
- d. **Otras Consideraciones:** En general, los PES operan más eficientemente con resistividades de polvo entre 5 x 10³ y 2 x 10¹⁰ ohm-cm. En general, las partículas más difíciles de recolectar son aquellas con diámetros aerodinámicos entre 0,1 y 1,0 μm. Las partículas entre 0,2 y 0,4 μm por lo general presentan la mayor penetración. Esto es más probablemente el resultado de la región de transición entre las cargas de campo y de difusión (EPA, 1998).

8. Requisitos de Pretratamiento de la Emisión:

Cuando gran parte del cargamento de contaminantes consiste en partículas relativamente grandes se pueden utilizar recolectores mecánicos, tales como los ciclones o las torres lavadoras, para reducir la carga sobre el PE, especialmente a concentraciones altas de entrada. A veces se utiliza equipo para acondicionamiento de gases para mejorar el funcionamiento de los PE al cambiar la resistividad del polvo como parte integral del diseño original, pero con mayor frecuencia se utiliza para modernizar los PE existentes. El equipo inyecta un agente dentro de la corriente gaseosa anterior al PE. Por lo general, el agente se mezcla con las partículas y altera su resistividad para promover una velocidad de migración más alta, y por lo tanto, una mayor eficiencia de recolección. Los agentes acondicionadores utilizados incluyen SO₃, H₂SO₄, compuestos de sodio, amoníaco, y agua; el agente acondicionador de mayor uso es el SO₃ (AWMA, 1992).

9. Información de Costos:

A continuación se presentan los rangos de costo (expresados en dólares al tercer trimestre de 1995) para los PES tipo tubo-alambre de diseño convencional bajo condiciones típicas de operación, desarrollados utilizando los formatos de la EPA para estimación de costos (EPA, 1996). Los costos pueden ser sustancialmente más altos que los rangos expuestos para los contaminantes que requieran un nivel extremadamente alto de control, o que requieran que los PE sean construidos con materiales especiales tales como el acero inoxidable o el titanio. En general, las unidades más pequeñas que controlen corrientes residuales de baja concentración no serán tan eficientes en costo, como lo será una unidad más grande que purifique una emisión con un contenido alto en contaminantes.

- a. **Costo de Capital:** \$65.000 a \$400.000 por sm³/s (\$30 a \$190 por scfm).
- b. **Costo de Operación y Mantenimiento:** \$10.000 a \$20.000 por sm³/s (\$10 a \$35 por scfm), anualmente
- c. **Costo Anualizado:** \$20.000 a \$75.000 por sm³/s (\$10 a \$35 por scfm), anualmente

d. **Eficiencia en el Costo:** \$55 a \$950 por tonelada métrica (\$50 a \$850 por tonelada corta)

10. Teoría de Operación:

Un PE es un dispositivo para el control de partículas que utiliza fuerzas eléctricas para movilizar las partículas encauzadas dentro de una corriente de emisión hacia las superficies de recolección. Una carga eléctrica es impartida a las partículas encauzadas cuando pasan a través de una “corona”, esto es, la región donde fluyen los iones en fase gaseosa. Los electrodos ubicados en el centro del plano del flujo se mantienen a un alto voltaje y generan un campo eléctrico que fuerza a las partículas hacia las paredes recolectoras. En los PES, los recolectores son golpeados, o “martillados”, por varios métodos mecánicos para desprender el particulado, que se desliza descendiendo hacia una tolva en donde es recolectado. Recientemente, los PES de tipo tubo-alambre están siendo lavados acústicamente con una bocina sónica (Flynn, 1999). Las bocinas, que típicamente son campanas de hierro forjado, por lo general son operadas con aire comprimido, y la vibración acústica es introducida por una placa de metal vibrante que interrumpe el flujo de aire periódicamente (AWMA, 1992). Tal como con el sistema a golpes (“martillo”), el particulado recolectado se desliza descendiendo hacia la tolva. La tolva es evacuada periódicamente a manera que ésta se llena. El polvo se retira a través de una válvula hacia un sistema que se lleva el polvo, tal como un transportador neumático, y después se desecha de una manera apropiada.

En el PE tipo tubo-alambre, también llamado PE tubular, el gas emitido fluye verticalmente a través de tubos conductivos, generalmente con varios tubos operando en paralelo. Los tubos pueden estar alineados en formación circular, cuadrada, o en forma de panal hexagonal. La tubería cuadrada y la hexagonal se pueden compactar más estrechamente que la tubería cilíndrica, reduciendo el espacio desaprovechado. Los tubos son normalmente de 7 a 30 cm (3 a 12 pulgadas) de diámetro y de 1 a 4 metros (3 a 12 pies) de longitud. Los electrodos de alto voltaje son alambres largos o “mastiles” rígidos, suspendidos de un marco en la parte superior del PE, que atraviesan el eje de cada tubo. Los electrodos rígidos están generalmente sostenidos tanto por un marco superior como por uno inferior. En los diseños modernos, se añaden puntas filosas a los electrodos, ya sea a la entrada o a lo largo del tubo, en forma de estrellas para proporcionar sitios de ionización adicionales (EPA, 1998; Flynn, 1999).

Las fuentes de energía para el PE convierten el voltaje AC industrial (220 a 480 voltios) a voltaje DC pulsante en el rango de 20.000 a 100.000 voltios según sea necesario. El voltaje aplicado a los electrodos causa que el gas entre los electrodos se descomponga eléctricamente, un acto conocido como una “corona.” Se suele impartir una polaridad negativa a los electrodos porque una corona negativa tolera un voltaje más alto antes de producir chispa que una corona positiva. Los iones generados en la corona siguen las líneas del campo eléctrico desde el electrodo hasta las superficies colectoras. Por lo tanto, cada combinación de tubo y electrodo establece una zona de carga a través de la cual deben pasar las partículas. Puesto que las partículas mayores ($>10 \mu\text{m}$ de diámetro) absorben varias veces más iones que las menores ($>1 \mu\text{m}$ de diámetro), las fuerzas eléctricas son mucho más fuertes en las partículas mayores (EPA, 1996).

Debido a los espacios libres necesarios para los componentes internos no electrificados en la parte superior de los PE tipo placa-alambre, una parte del gas puede desviarse alrededor de las zonas de carga. A esto se le llama “fuga furtiva” e impone un límite máximo a la eficiencia de recolección. Los PES tipo tubo-alambre no proporcionan trayectorias de fuga alrededor de la región recolectora, pero las irregularidades en la uniformidad del campo pueden permitir que algunas partículas eviten cargarse durante una fracción considerable de la longitud del tubo. Sin embargo, los PE tipo tubo-alambre están propensos al reencauzamiento del material recolectado después de lavar los recolectores con un mecanismo de martilleo o acústico, aunque el estilo cerrado de la tubería aumenta la probabilidad de recolección adicional (AWMA, 1992).

Otro factor principal en el funcionamiento es la resistividad del material recolectado. Debido a que las partículas forman una capa continua sobre la tubería del PE, toda la corriente iónica debe atravesar la capa para alcanzar el suelo. Esta corriente crea un campo eléctrico en la capa, y puede volverse lo suficientemente grande como para causar una avería eléctrica local. Cuando esto ocurre, iones nuevos de la polaridad opuesta son inyectados dentro del espacio entre el tubo y el alambre, en donde reducen la carga sobre las partículas y pueden causar chispas. A ésta condición de avería se le llama “corona reversa”. La corona reversa prevalece cuando la resistividad de la capa es alta, por lo general sobre 2×10^{11} ohm-cm. Por encima de este nivel, la capacidad de recolección de la unidad se reduce considerablemente porque la corona reversa severa causa dificultades para cargar las partículas. Las resistividades bajas también causarán problemas. A resistividades menores de 10^8 ohm-cm, las partículas se retienen sobre la superficie colectora de una manera tan suelta que tanto el reencauzamiento general, como aquél asociado con la limpieza de los recolectores, se vuelven mucho más severos. Por lo tanto, se debe tener cuidado al medir o al estimar la resistividad porque es afectada fuertemente por variables tales como la temperatura, humedad, la composición del gas, la composición de las partículas, y las características de la superficie (AWMA, 1992).

11. Ventajas/Pros:

Los PES tipo tubo-alambre y otros PE en general, debido a que actúan únicamente sobre el particulado por eliminar, y sólo impiden el flujo de la corriente de gas de manera mínima, tienen bajas de presión muy pequeñas (típicamente menores de 13 mm (0,5 pulgadas) de columna de agua). Como resultado, los requisitos energéticos y los costos de operación tienden a ser bajos. Son capaces de alcanzar eficiencias muy altas, aún con partículas muy pequeñas. Pueden ser diseñados para un rango amplio de temperaturas de gases, y pueden manejar temperaturas altas, hasta los 700°C (1300°F). La recolección y eliminación del residuo en seco permite una manipulación fácil. Los costos de operación son relativamente bajos. Los PE son capaces de operar bajo presiones altas (hasta 1 030 kPa (150 psi)) o condiciones de vacío. Las velocidades de flujo relativamente grandes se pueden manejar de manera efectiva, aunque son poco comunes en los PE tubulares (AWMA, 1992).

12. Desventajas/Contras:

Los PE tienen costos de capital generalmente altos. Los electrodos de descarga fabricados de alambre (aproximadamente 2,5 mm (0,01 in.) de diámetro), requieren altos niveles de mantenimiento. Puede presentarse corrosión cerca de la parte superior de los alambres por el efecto de fugas de gas y la condensación ácida. Además, los alambres largos sujetos con pesas tienden a oscilar - la parte media del alambre puede acercarse al tubo, causando más chispas y desgaste. Los diseños de PE más nuevos tienden a utilizar los electrodos rígidos, o “mastiles” que eliminan en gran parte los inconvenientes del uso de electrodos de alambre (Cooper y Alley, 1994; Flynn, 1999).

En general los PE no son muy apropiados para uso en procesos que sean demasiado variables, debido a que son muy sensibles a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas (velocidad de flujo, temperatura, composición de las partículas y del gas, y el cargamento de las partículas). Los PE también son difíciles de instalar en sitios con espacio limitado puesto que los PES deben ser relativamente grandes para obtener las bajas velocidades de gas necesarias para la recolección eficiente de PM (Cooper y Alley, 1994). Ciertas partículas son difíciles de recolectar debido a sus características de resistividad demasiado altas o bajas. Puede existir un peligro de explosión al tratar gases combustibles y/o recolectar partículas combustibles. Se requiere personal de mantenimiento relativamente sofisticado, así como de precauciones especiales para proteger al personal del alto voltaje. Los PES no son recomendables para la eliminación de partículas pegajosas o húmedas. Se produce ozono por el electrodo de carga negativa durante la ionización del gas (AWMA, 1992).

13. Otras Consideraciones:

Los polvos con resistividades muy altas (mayores de 10^{10} ohm-cm) tampoco son idóneos para la recolección en los PES. Estas partículas no se cargan fácilmente, y por lo tanto no se recolectan fácilmente. Además, las partículas de alta resistividad generan capas de ceniza con pendientes de voltaje muy altas sobre los electrodos colectores. Las averías eléctricas en estas capas de ceniza conducen a la inyección de iones cargados positivamente dentro del espacio entre los electrodos de descarga y de colección (corona reversa), reduciendo de este modo la carga en las partículas en este espacio y disminuyendo la eficiencia de recolección. La ceniza flotante proveniente de la combustión del carbón bajo en azufre tiene típicamente una resistividad alta, y por ello es difícil de recolectar (ICAC, 1999).

14. Referencias:

AWMA, 1992. *Air & Waste Management Association, Air Pollution Engineering Manual, Van Nostrand Reinhold, New York.*

Cooper & Alley, 1994. *C. D. Cooper and F. C. Alley, Air Pollution Control: A Design Approach, Second Edition, Waveland Press, Inc. IL.*

EPA, 1996. *U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "OAQPS Control Cost Manual," Fifth Edition, EPA 453/B-96-001, Research Triangle Park, NC. February.*

EPA, 1997. *U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I, Fifth Edition, Research Triangle Park, NC., October.*

EPA, 1998. *U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter," EPA-452/R-97-001, Research Triangle Park, NC., October.*

Flynn, 1999. *Brian Flynn, Beltran Associates, Inc., (718) 338-3311, personal communication with Eric Albright, February 5, 1999.*

ICAC, 1999. *Institute of Clean Air Companies internet web page www.icac.com, Control Technology Information - Electrostatic Precipitator, page last updated January 11, 1999.*

STAPPA/ALAPCO, 1996. *State and Territorial Air Pollution Program Administrators and Association of Local Air Pollution Control Officials, "Controlling Particulate Matter Under the Clean Air Act: A Menu of Options," July.*